

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

**UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE
CONTROLADA A TIRISTOR (TCSC) PARA O
AUMENTO DA MARGEM DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Autor: Afonso Santos Gonçalves de Menezes
Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique J. R. da Silva

Brasília, DF
2022



Afonso Santos Gonçalves de Menezes

**UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE
CONTROLADA A TIRISTOR (TCSC) PARA O
AUMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique J. R. da Silva

Brasília, DF

2022

Afonso Santos Gonçalves de Menezes

UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA A TIRISTOR (TCSC) PARA O AUMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA/ Afonso Santos Gonçalves de Menezes. – Brasília, DF, 2022-

49 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique J. R. da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Prof. Dr. Flávio Henrique J. R. da Silva. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA A TIRISTOR (TCSC) PARA O AUMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

CDU 02:141:005.6

Afonso Santos Gonçalves de Menezes

UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA A TIRISTOR (TCSC) PARA O AUMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 01 de junho de 2022:

**Prof. Dr. Flávio Henrique J. R. da
Silva**
Orientador

Titulação e Nome do Professor
Convidado 01
Convidado 1

Titulação e Nome do Professor
Convidado 02
Convidado 2

Brasília, DF
2022

*“Se enxerguei mais longe,
foi por estar apoiado sobre
o ombro de gigantes”.*
(Isaac Newton)

Resumo

Tendo em vista que o desenvolvimento de uma sociedade está atrelado ao seu consumo energético, seja ele em crescimento ou em um patamar estável, é necessário que haja um sistema de geração, transmissão e distribuição confiável com o intuito de garantir que a energia chegue ao consumidor final. No caso do Brasil há o Sistema Interligado Nacional, o qual é responsável por fazer as interligações entre as regiões geradoras e consumidoras, garantindo a disponibilidade, confiabilidade e estabilidade do sistema. Uma maneira de se aumentar essas características é com a utilização de equipamentos *FACTS*. Neste trabalho faz-se a utilização de um dispositivo *FACTS* denominado de *TCSC* que é um capacitor série controlado a tiristor, que tem como objetivo aumentar a margem de estabilidade do sistema. Sendo assim, uma modelagem matemática dos componentes do sistema elétrico é feita, incluindo máquinas síncronas e seus modelos, linhas de transmissão e cargas. O intuito do estudo de estabilidade em sistemas elétricos de potência é fazer com que haja o aumento da margem de estabilidade em equipamentos de proteção sem que as máquinas percam seu sincronismo. Portanto foram realizadas simulações no software *MATLAB* em um circuito contendo os elementos citados inicialmente sem a inclusão do *TCSC*, e em sequência foram realizadas simulações com a sua adição. Foi analisado o comportamento do circuito elétrico pré a ocorrência da falta, durante e após a sua eliminação, e também foi estimado o tempo de abertura do dispositivo de segurança do sistema com e sem a utilização do dispositivo.

Palavras-chaves: estabilidade transitória. TCSC. sistemas elétricos de potência. aumento da margem de estabilidade

Abstract

Given that the development of a society is linked to its energy consumption, whether it is growing or at a stable level, it is necessary to have a reliable generation, transmission and distribution system in order to ensure that energy reaches the consumer. In the case of Brazil, there is the National Interconnected System (SIN), which is responsible for making the interconnections between the generating and consuming regions, guaranteeing the availability, reliability and stability of the system. One way to increase these characteristics is with the use of *FACTS* equipment. In this work, a *FACTS* device called *TCSC* is used, which is a thyristor-controlled series capacitor, which aims to increase the stability margin of the system. Thus, a mathematical modeling of the components of the electrical system is made, including synchronous machines and their models, transmission lines and loads. The purpose of the stability study in electrical power systems is to increase the stability margin in protective equipment without the machines losing their synchronism. Therefore, simulations were carried out in the software *MATLAB* in a circuit containing the elements mentioned initially without the inclusion of *TCSC*, and simulations were carried out in sequence with its addition. The behavior of the electrical circuit was analyzed before the occurrence of the fault, during and after its elimination, and the opening time of the system safety device with and without the use of the device was also estimated.

Key-words: transient stability. TCSC. electrical power systems. increase in stability margin

Lista de ilustrações

Figura 1 – Malha de linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (ONS, 2021).	14
Figura 2 – Tipos de estabilidade em sistemas elétricos de potência (MACHOWSKI et al., 2020).	15
Figura 3 – Esquemático de um Gerador conectado a um barramento infinito através de linhas de transmissão (MACHOWSKI et al., 2020).	20
Figura 4 – Estator e rotor de um gerador síncrono (CHAPMAN, 2013).	20
Figura 5 – Exemplificação de modelo de uma linha de transmissão com seus parâmetros por fase (KUNDUR, 1949).	27
Figura 6 – Circuito equivalente de uma linha curta (FUCHS, 1977).	27
Figura 7 – Circuito equivalente de uma linha média (FUCHS, 1977).	29
Figura 8 – Tipos de estabilidades em um sistema elétrico de potência e os tipos de perturbações (KUNDUR, 1949).	34
Figura 9 – Curva Potência versus Ângulo de potência de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito. (MACHOWSKI et al., 2020).	37
Figura 10 – Região de atração de uma máquina elétrica. (BRETAS; ALBERTO, 2000).	38
Figura 11 – Sistema elétrico de duas áreas com quatro máquinas elétricas. (KUNDUR, 1949).	40
Figura 12 – Esquemático do sistema elétrico estudado sem o TCSC reproduzido no MATLAB. (MATLAB, 2021).	42
Figura 13 – Variação dos ângulos de potência e velocidades angulares das máquinas com abertura do relé em 0,13 segundos após a falta. (Autor, 2021).	43
Figura 14 – Variação das tensões nos barramentos da máquinas M1 e M3 nas áreas A1 e A2 com tempo de atuação do relé 0,13s após a falta. (Autor, 2021).	44
Figura 15 – Fluxo de potência entre as áreas A1 e A2 com tempo de atuação do relé 0,13s após a falta. (Autor, 2021).	44
Figura 16 – Variação dos ângulos de potência e velocidades angulares das máquinas com abertura do relé em 0,143s após a falta. (Autor, 2021).	45
Figura 17 – Variação das tensões nos barramentos da máquinas M1 e M3 nas áreas A1 e A2 com abertura do relé em 0,143s após a falta. (Autor, 2021).	45
Figura 18 – Fluxo de potência entre as áreas A1 e A2 com abertura do relé em 0,143s após a falta. (Autor, 2021).	45

Lista de abreviaturas e siglas

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
TRAFO	Transformador
pu	Por Unidade
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
SIN	Sistema Interligado Nacional

Lista de símbolos

δ	Ângulo de torque elétrico
δ_{mec}	Ângulo de torque mecânico
P_{mec}	Potência mecânica
$P_{elét}$	Potência elétrica
$P_{elétMAX}$	Potência elétrica máxima
T_{ap}	Torque mecânico aplicado
T_{ind}	Torque elétrico induzido
ω_{mec}	Velocidade angular mecânica
E_A	Tensão interna do gerador síncrono
E_A	Corrente interna do gerador síncrono
V_ϕ	Tensão nos terminais do gerador síncrono
X_S	Reatância
R_A	Resistência elétrica de armadura
\dot{U}_1	Tensão elétrica no emissor da transmissão
\dot{U}_2	Tensão elétrica no receptor da transmissão
\dot{I}_1	Corrente elétrica no emissor da transmissão
\dot{I}_2	Corrente elétrica no receptor da transmissão
\dot{Z}_c	Impedância característica da linha
Z	Impedância em série por unidade de comprimento da linha
Y	Admitância em paralelo por unidade de comprimento da linha
R	Resistência
G	Condutância
L	Indutância

C	Capacitância
$\dot{\gamma}$	Constante de propagação da linha de transmissão
l	Comprimento da linha de transmissão
J	Momento de inércia
ω	Velocidade angular
$\dot{\omega}$	Aceleração Angular
ω_{mecf}	Velocidade Angular durante uma perturbação
$\omega_{elét}$	Velocidade síncrona elétrica
ω_{syn}	Velocidade de rotação síncrona mecânica
θ	Ângulo entre o ângulo de potência mecânico e ângulo de campo magnético
θ_{mag}	Ângulo de campo magnético girante
E_{CR}	Energia Cinética de Rotação
Mi	Momento de inércia
M	Constante de inércia
H	Constante de inércia em pu
p	Número de polos de uma máquina síncrona
S	Potência elétrica aparente
f_0	Frequência de operação da rede
vd	Componente da tensão no eixo direto
vq	Componente da tensão no eixo de quadratura
id	Componente da corrente no eixo direto
iq	Componente da corrente no eixo de quadratura
x_d	Reatância do eixo direto
x'_q	Reatância transitória do eixo de quadratura
E'_fd	Tensão de excitação
T	Coeficiente de amortecimento

Sumário

I	INTRODUÇÃO	13
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Objetivos do Trabalho	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivo Específico	16
1.3	Composição e estrutura do trabalho	17
II	MODELAGEM MATEMÁTICA	18
2	SISTEMA ELÉTRICO E SEUS COMPONENTES	19
2.1	Máquinas Síncronas	20
2.1.1	Contextualização	20
2.1.2	Componentes e Funcionamento	20
2.1.3	Regime Transitório	21
2.1.3.1	Modelo Clássico	22
2.1.3.2	Modelo De 1-Eixo	24
2.2	Linhas de Transmissão	25
2.2.1	Contextualização	25
2.2.2	Cálculo e Modelagem Simplificados	26
2.2.2.1	Linhas Curtas	27
2.2.2.2	Linhas Médias	28
2.2.2.3	Linhas Longas	28
2.3	Cargas	29
2.3.1	Modelo ZIP	29
III	ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	32
3	CONTEXTUALIZAÇÃO	33
3.1	Análise Da Estabilidade	34
3.1.1	Pré-falta	35
3.1.2	Durante a falta	35
3.1.3	Pós-falta	36
3.2	Pontos de Equilíbrio	36
3.2.1	Região de Estabilidade	38

4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS PARCIAIS	40
4.1	Modelo De Duas Áreas	40
4.2	Falta trifásica sem a utilização do TCSC	42
IV	CONCLUSÕES	46
5	CONCLUSÕES PARCIAIS	47
6	ATIVIDADES FUTURAS	48
	REFERÊNCIAS	49

Parte I

Introdução

1 Introdução

1.1 Contextualização

Uma das premissas para o aumento do desenvolvimento da sociedade moderna está diretamente ligada ao seu consumo de energia, uma vez que, na medida em que há o aumento do seu desenvolvimento há igualmente também um aumento do consumo de energia (CARVALHO, 2014). Sendo assim, é necessária que seja garantida a entrega desse suprimento de energia ao consumidor final através de um sistema confiável, uma vez que a demanda é contínua.

No Brasil há o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte composto por quatro grandes subsistemas: Centro-Oeste/Sudeste, Nordeste, Norte e Sul. Há a interconexão entre esses subsistemas e seus recursos de geração por meio de uma grande malha de transmissão, proporcionando a transferência de energia entre eles e assim atendendo a demanda energética (ONS, 2021). A representação da malha de transmissão do SIN pode ser observada na Fig.1.



Figura 1 – Malha de linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (ONS, 2021).

Devido a sua grande extensão territorial, este sistema está exposto a ocorrência de

perturbações a todo instante, fazendo com que possa ocorrer a perda da sua estabilidade. Com o intuito de se mitigar a ocorrência dessas perturbações foram desenvolvidos ao longo dos anos técnicas e equipamentos para o auxílio da manutenção da estabilidade desses sistemas. Segundo (SAADAT et al., 1999) a estabilidade pode ser definida como “a tendência de um sistema elétrico de potência em desenvolver forças restauradoras iguais ou maiores que a perturbação para manter o estado de equilíbrio”.

Por ser um sistema que deve operar em ordens de grandeza de quilômetros, os sistemas elétricos devem ser muito bem planejados e oferecerem segurança, para isso existe um critério de engenharia utilizado que é o critério $n-1$, o qual significa que o sistema deve ser capaz de continuar em operação mesmo com a perda de algum elemento de sua composição sem que não seja interrompido o fornecimento de energia. Esse critério é para garantir que o fornecimento de energia seja feito, os limites de sobrecargas e equipamentos não sejam atingidos, a perda de estabilidade seja evitada e não haja perda de violação de grandezas elétricas como tensão e frequência

As consequências caso haja a perda da estabilidade é o desligamento da máquina do sistema até que a seja apropriado novamente a sua reconexão, e assim isso pode causar apagões e falta de fornecimento de energia elétrica em diversas regiões, causando prejuízos econômicos significativos. Sendo assim, teve-se a necessidade de estudar a estabilidade de sistemas de potência, e esse estudo é dividido em áreas de concentração segundo a Fig.2, sendo que para este trabalho serão considerados os estudos na área de estabilidade transitória.

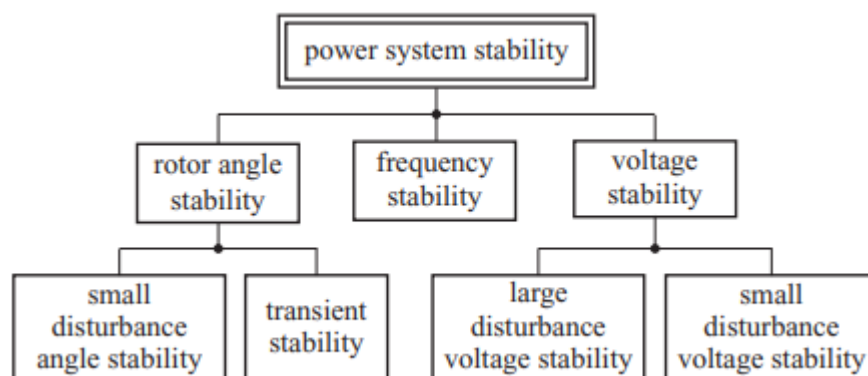


Figura 2 – Tipos de estabilidade em sistemas elétricos de potência (MACHOWSKI et al., 2020).

A estabilidade transitória, também conhecida como estabilidade angular, é um ramo do estudo da estabilidade em sistemas elétricos de potência em que são consideradas grandes perturbações e a capacidade das máquinas síncronas se manterem operando durante e após essas condições e que seja mantido seu sincronismo. Exemplos de grandes perturbações ou faltas são percas de linhas de transmissão, curtos circuitos e perda de unidades geradoras com aberturas de sistemas de proteção. Como sistemas de potência

são não lineares, a sua estabilidade depende da intensidade da perturbação e também das condições iniciais pré-falta (MACHOWSKI et al., 2020).

Uma maneira de se mitigar os efeitos das perturbações que ocorrem no sistema é com a utilização de dispositivos *FACTS* (*Flexible Alternating Current Transmission System*), que correspondem a equipamentos conectados às linhas de transmissão, realizando um tipo de compensação e assim permitindo um maior fluxo de potência através das linhas, diminuindo ou aumentando sua impedância, amortecendo oscilações eletromecânicas, regulando o nível de tensão, e por consequência otimizando a confiabilidade do sistema.

Para este trabalho especificamente o dispositivo *FACTS* estudado será o *TCSC* (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), que consiste de um capacitor em série com a linha de corrente alternada de transmissão sendo compensada por um tiristor em paralelo com esse mesmo capacitor. O intuito desse equipamento é fazer a compensação do fluxo de potência através de uma linha de transmissão e aumentar a margem de estabilidade e do tempo de abertura de equipamentos de segurança, como relés, quando há a ocorrência de uma falta, possibilitando que a máquina possa ter uma maior região de estabilidade sem que perca seu sincronismo.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar e analisar o aumento da margem de estabilidade de um sistema elétrico de potência. Para isto faz-se o uso de modelos computacionais dos componentes elétricos presentes nesse sistema e os utiliza para realização de simulações dispondo do software *MATLAB* para a executá-las.

1.2.2 Objetivo Específico

O intuito deste trabalho é estudar a influência do *TCSC* em um sistema composto de quatro máquinas síncronas conectadas a linha de transmissão. Espera-se a melhoria da margem da estabilidade com a inclusão do *TCSC*, dessa forma a compensação serie vai controlar o fluxo de potencia na linha de transmissão. Assim, com a inserção desse equipamento a intenção é que haja o aumento do tempo de resposta da atuação dos relés de proteção do sistema elétrico em análise.

1.3 Composição e estrutura do trabalho

A composição deste trabalho é dividida em introdução e contextualização do funcionamento do sistema elétrico e definição do SIN no primeiro capítulo, modelagem dos componentes que fazem parte de um sistema de geração e transmissão de energia no capítulo 2, definição de estabilidade transitória e simulações de um sistema elétrico sem a presença do *TCSC* no capítulo 3, conclusões parciais, atividades futuras como a inclusão dos *FACTS* com simulações e cronograma de atividades para continuidade deste trabalho no capítulo 4.

Parte II

Modelagem Matemática

2 Sistema Elétrico e Seus Componentes

Este trabalho terá como objeto de estudo a análise da estabilidade angular que ocorre em sistemas elétricos de potência, a consequência da ocorrência de perturbações e faltas que ocasionam instabilidades, a manutenção ou perda do sincronismo de uma máquina síncrona no sistema, e o estudo comparativo entre a utilização de *FACTS* para o aumento da margem temporal de retorno ao sincronismo dessas máquinas em relação à não utilização desses equipamentos. Sendo assim, para que esse estudo possa ser realizado é necessária uma modelagem matemática para descrever os elementos que compõem esse sistema. Essa modelagem é composta por um conjunto de equações algébricas e diferenciais e que, para a construção do modelo adotado neste trabalho, simplificações foram consideradas.

A premissa sobre o estudo de estabilidade de um sistema elétrico de potência é a de que ele permaneça em regime permanente sempre que não houver alguma falta. No entanto isso é apenas uma simplificação, uma vez que ao decorrer do dia sempre haverá pequenas e grandes variações de carga, pequenas e grandes perturbações e até mesmo faltas, o que ocasiona por consequência variações no sistema e assim ele nunca estará em regime permanente, operando portanto em regime transitório a todo momento ([PADIYAR, 2007](#)).

Sendo assim, no que diz respeito à modelagem matemática, ela nunca irá representar com fidelidade total o comportamento de um sistema elétrico uma vez que ela considera que há regime permanente quando não existe a ocorrência de perturbações e faltas. Isso significa que a implementação de um equacionamento que represente com perfeição todos os aspectos de um sistema com máquinas, linhas de transmissão e carga se torna algo inconcebível. Logo, os estudos na área de estabilidade são utilizados para a melhor compreensão desses fenômenos mas não para descrevê-los em sua plenitude total devido às diversas simplificações aplicadas. ([SAADAT et al., 1999](#))

Sabendo que as simplificações deverão ser introduzidas ao estudo de estabilidade de sistemas elétricos, uma das maneiras de fazer a modelagem dessas simplificações é a utilização de apenas uma máquina síncrona que está conectada a uma linha de transmissão e que, por fim, estará fazendo a conexão a um barramento infinito ao final do circuito. Um esquemático desse tipo de configuração pode ser observado na Fig.3 em que nele estão dispostos gerador, duas linhas L1 e L2 entre barramentos, transformador e carga ao final.

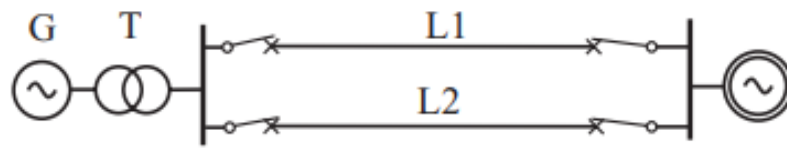


Figura 3 – Esquemático de um Gerador conectado a um barramento infinito através de linhas de transmissão (MACHOWSKI et al., 2020).

2.1 Máquinas Síncronas

2.1.1 Contextualização

O primeiro elemento presente na Fig.3 representa um gerador e que, na maior parte das abordagens como máquina elétrica, é tratado como uma máquina síncrona ou igualmente um gerador síncrono. Embora existam outros tipos de máquinas síncronas como motores síncronos e assíncronos, além de também haver o gerador assíncrono, especificamente neste trabalho a abordagem será no âmbito de geradores síncronos, sendo assim sempre que máquina síncrona ou gerador síncrono for dito representarão a mesma máquina. Acerca dos aspectos construtivos desse tipo de equipamento, ele é constituído por duas partes principais em sua estrutura e que são os responsáveis pelo seu funcionamento: rotor e o estator que podem ser observados na Fig.4.

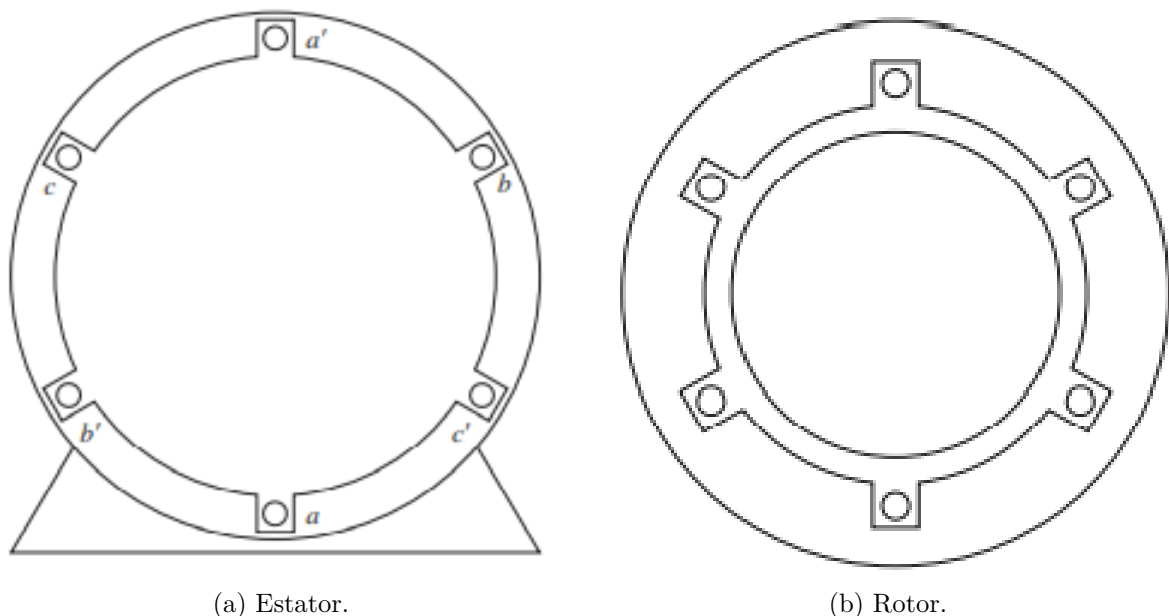


Figura 4 – Estator e rotor de um gerador síncrono (CHAPMAN, 2013).

2.1.2 Componentes e Funcionamento

Os nomes dos dois elementos na Fig.4 tornam o entendimento de suas respectivas funções bastante intuitivo, uma vez que o rotor representa a parte girante de uma máquina

síncrona, já o estator é a parte fixa. O funcionamento de um gerador síncrono ocorre quando uma corrente elétrica CC é aplicada aos enrolamentos que estão inseridos na estrutura do rotor, quando esta corrente elétrica é aplicada se obtém um campo magnético constante. Na medida em que o rotor gira, igualmente o campo magnético também irá acompanhar este movimento e a variação desse campo magnético irá induzir uma tensão nos terminais dos enrolamentos do estator (UMANS, 2014).

Os enrolamentos presentes em cada uma das partes do gerador podem também ser denominados de *enrolamento de campo*, no rotor, e para os enrolamentos no estator *enrolamento de quadratura*. Além disso, os rotores de geradores síncronos também podem ser classificados em rotores de *polos lisos* ou *polos salientes* (CONCORDIA, 1951), no entanto o aprofundamento nas definições dos tipos de rotor e o que definem suas particularidades não cabem ao escopo deste trabalho.

A função de um gerador síncrono é fazer a conversão da potência mecânica empregada no eixo do rotor em potência elétrica na saída dos terminais do estator. Existem diversas fontes que podem ser a fonte matriz de potência mecânica, como por exemplo uma turbina hidráulica, uma turbina a vapor, um motor diesel ou então qualquer outra fonte que possa colocar um eixo em rotação e que esteja interligado ao gerador (UMANS, 2014). Embora sejam diversas as possibilidades de se ter uma fonte primária para o fornecimento de potência mecânica, essa deve possuir a propriedade de manter sua velocidade de rotação quase que constante, havendo poucas variações, independentemente da potência demandada, fazendo com que a máquina não perca seu sincronismo (SAADAT et al., 1999).

2.1.3 Regime Transitório

A abordagem sobre de máquinas síncronas que é utilizada em literaturas como (CHAPMAN, 2013) e (UMANS, 2014) é insuficiente para o estudo de análise transitória, isso ocorre devido ao fato de que esse tipo de análise requer um equacionamento matemático mais robusto que não é utilizado em regime permanente, o que impossibilitando a sua utilização no estudo de estabilidade de sistemas elétricos de potência. O estudo das máquinas síncronas em regime transiente engloba uma modelagem matemática com um extenso número de equações diferenciais, e um estudo detalhado com essa quantidade de equações em sua maioria seria inviável, portanto algumas simplificações serão adotadas.

Sendo assim, nesta sessão será desenvolvida a modelagem matemática para uma máquina síncrona durante a ocorrência de uma falta ou perturbação. Na sessão 2.1.2 foram enunciados os conceitos de enrolamento de campo e enrolamento de quadratura. A noção e diferenciação desses dois tipos de enrolamentos é de suma importância para o entendimento de uma máquina síncrona em regime transiente. Existem alguns tipos de modelagem matemática simplificadas para máquinas elétricas em regime transiente,

sendo elas modelagens clássica, 1-eixo e 2-eixos (KRISHNA, 2014). Para este trabalho a modelagem será de 1-eixo para componentes do sistemas elétrico de potência.

2.1.3.1 Modelo Clássico

Como foi explicitado na sessão 2.1.2, o funcionamento de uma máquina síncrona se resume em uma potência mecânica P_{mec} na entrada que aplicará um torque mecânico T_{mec} ao rotor, e que ao girar irá gerar uma tensão induzida nos terminais do estator e por consequência irá produzir um torque elétrico $T_{elét}$. Em condições de regime permanente e negligenciando perdas tem-se que

$$T_{mec} = T_{elét} \quad (2.1)$$

Quando há a ocorrência de uma perturbação, causando então o movimento relativo entre os eixos de referência do rotor e campo magnético girante, há também a diferença entre os torques que é denominado torque de aceleração e descrito como

$$T_{ac} = T_{mec} - T_{elét} \quad (2.2)$$

É conveniente notar ainda que, como se trata de corpos em rotação, existe uma grandeza matemática J denominada de momento de inércia, e seu significado físico-mensurável é a dificuldade de se colocar um corpo em rotação. E mais, para corpos em rotação, a equação do torque aplicado é $T = J \cdot \dot{\omega}$ em que $\dot{\omega}$ é a aceleração angular. A aceleração angular que é aplicada no eixo do rotor de uma máquina síncrona durante uma perturbação pode ser calculada da seguinte maneira

$$\dot{\omega}_f = \frac{d\omega_f}{dt} \quad (2.3)$$

Além disso, a velocidade angular mecânica após uma perturbação ω_{mecf} pode ser calculada como

$$\omega_{mecf} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

Em que o termo θ é o ângulo entre o ângulo de potência δ_{mec} do eixo do rotor e o eixo do campo magnético girante θ_{mag} ambos em relação à mesma referência inicial. Sendo assim, fazendo a combinação da equação 2.3 com a relação de torque com aceleração angular e momento de inércia tem-se

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_{mec} - T_{elét} = T_{ac} \quad (2.5)$$

É possível caracterizar o ângulo θ como sendo $\theta = \delta_{mec} + \omega_f \cdot t$ em que t é o tempo de duração da perturbação e ω_f a velocidade angular devido à falta aplicada ao rotor. Aplica-se a derivada no tempo em relação à equação do ângulo θ

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_f + \frac{d\delta_{mec}}{dt} \quad (2.6)$$

Aplica-se novamente a derivada em relação ao tempo em ambos os lados, porém dessa vez na Eq. 2.6

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta_{mec}}{dt^2} \quad (2.7)$$

Da Eq. 2.7 é possível perceber que a aceleração angular aplicada ao rotor devido a perturbação é igual a aceleração angular desenvolvida pelo eixo do rotor. Sendo assim, fazendo a devida substituição da Eq. 2.7 na Eq. 2.5 é possível obter

$$J \frac{d^2\delta_{mec}}{dt^2} = T_{mec} - T_{elét} \quad (2.8)$$

Em seguida ambos os lados da Eq. 2.8 são multiplicados por ω_{mecf} , e ainda sabendo que potência P pode ser calculada com base no torque T e velocidade angular ω como $P = T \cdot \omega$ é fácil ver que

$$J\omega_{mecf} \frac{d^2\delta_{mec}}{dt^2} = P_{mec} - P_{elét} \quad (2.9)$$

A grandeza $J\omega_{mecf}$ é comumente conhecida como constante de inércia M e ela é relacionada com a energia cinética de corpos rotativos E_{CR} da seguinte maneira

$$E_{CR} = \frac{1}{2} M \omega_{mecf}^2 = \frac{1}{2} J \omega_{mecf}^2 \quad (2.10)$$

Também pode ser rearranjada como

$$M = \frac{2 \cdot E_{CR}}{\omega_{mecf}^2} \quad (2.11)$$

Há outro detalhe que deve ser considerado, durante o processo de ocorrência de uma perturbação no sistema, a componente ω_{mecf} não varia tanto do valor de referência quando há estabilidade, que é a velocidade síncrona, sendo assim a energia cinética rotacional pode ser avaliada usando como referência a velocidade síncrona inicial (SAADAT et al., 1999).

$$M = \frac{2 \cdot E_{CR}}{\omega_{syn}^2} \quad (2.12)$$

Portanto, fazendo a devida substituição da equação 2.12 na equação 2.9 tem-se que a equação de swing em termos da constante de inércia é

$$M \frac{d^2 \delta_{mec}}{dt^2} = P_{mec} - P_{elét} \quad (2.13)$$

Outras considerações relevantes a serem consideradas são que, primeiramente é conveniente descrever o ângulo δ_{mec} em termos do ângulo de potência com base no número de polos p do rotor. Ademais, Também é comum descrever a equação de swing no sistema pu (por unidade). A conversão do ângulo de potência mecânico em elétrico é

$$\delta = \frac{p \cdot \delta_{mec}}{2} \quad (2.14)$$

Após a substituição da equação 2.14 na equação 2.13 e efetuado-se a divisão em ambos os lados por S , que é a potência elétrica aparente, obtém-se a expressão

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2E_{CR}}{\omega_{syn} S} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_{mec}}{S} - \frac{P_{elét}}{S} \quad (2.15)$$

Como agora as grandezas na equação estão todas referenciadas com base na potência aparente S , isso significa na adoção do sistema pu , sendo assim, convém denotar também a constante de inércia pelo sistema pu , em unidades de MJ por MVA e a nova variável de interesse será na forma de $H = \frac{E_{CR}}{S}$. Reescrevendo a equação 2.15 tem-se que

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{syn} S} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{mec(pu)} - P_{elét(pu)} \quad (2.16)$$

Sabe-se ainda que a conversão entre a velocidade síncrona mecânica ω_{syn} e a velocidade síncrona elétrica $\omega_{elét}$ ocorre por meio da equação $\omega_{syn} = \frac{2\omega_{elét}}{p}$, a equação 2.16 com a modificação acima fica como

$$\frac{2H}{\omega_{elét}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{mec(pu)} - P_{elét(pu)} \quad (2.17)$$

Por fim, a forma final da equação de Swing - e em termos de frequência de rotação e também suprimindo os termos pu entre parênteses por já estarem subentendidos -, é escrita na equação 2.18.

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{mec} - P_{elét} \quad (2.18)$$

2.1.3.2 Modelo De 1-Eixo

No modelo de 1-eixo, uma das simplificações adotadas é a desconsideração dos fenômenos ocorridos durante o período subtransitório - período este dentre os períodos da

segmentação de uma falta - que possui o menor tempo de duração, sendo este entre 0,01s e 0,1s (KUNDUR, 1949). Sendo assim, para este tipo de modelagem são considerados apenas os efeitos ocorridos durante o período transitório, o qual possui uma duração maior. Além disso, também serão desprezados os efeitos presentes no enrolamento amortecedor, as tensões transformatórias e deve-se considerar $\omega = 1p.u$ nas equações elétricas do estator (RAMOS et al., 2000). Os parâmetros que devem ser considerados nesse modelo estão são

$$\begin{cases} \delta = \omega_{elét} \\ \dot{\omega}_{elét} = \frac{1}{J}(P_{mec} - P_{elé} - T\omega_{elét}) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{\tau'_{do}}(E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d)i_d) \end{cases} \quad (2.19)$$

Das equações acima, são definidos os termos como J momento de inércia, $P_{elé}$ potência elétrica na saída da máquina, P_{mec} potência mecânica do rotor, T coeficiente de amortecimento, E_{fd} tensão de excitação, x_d reatância do eixo direto e x'_d reatância transitória do eixo direto, E'_q componente de eixo de quadratura da máquina, δ desvio angular e $\omega_{elét}$ velocidade angular elétrica. Calcula-se também a potência elétrica nos terminais da máquina como sendo

$$P_{elé} = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.20)$$

em que v_d e v_q são calculadas como

$$v_d = x'_q i_q \quad (2.21)$$

$$v_q = E'_q - x'_d i_d \quad (2.22)$$

Nas equações 2.21 e 2.22 os termos v_d , v_q , i_d , i_q e x'_q são respectivamente: componente da tensão no eixo direto, componente da tensão no eixo de quadratura, componente do eixo direto da corrente, componente do eixo de quadratura da corrente e reatância transitória do eixo de quadratura (SILVA, 2004).

2.2 Linhas de Transmissão

2.2.1 Contextualização

As linhas de transmissão são responsáveis por fazer a interligação entre os sistemas geradores de energia e os consumidores finais. Essas linhas são compostas basicamente por torres de sustentação, condutores energizados, isoladores, sinalizadores, para-raios e ferragens. Embora a transmissão por linhas aéreas seja o método mais convencional, há

também a transmissão submarina e por condutores isolados do meio externo sem que o ar seja o isolante. O tipo mais comum de transmissão de energia elétrica se dá através de corrente alternada, em que a energia gerada possui sinais de corrente e tensão em regime senoidal (PADIYAR, 2007).

Após a geração e antes da energia ser transmitida para os centros consumidores, com o intuito de diminuir as perdas por efeito joule, há uma elevação dos níveis de tensão previamente a transmissão, sendo que no Brasil há alguns níveis de tensão de transmissão estabelecidos com base na potência que será transmitida, e ao chegar novamente aos centros consumidores, esse nível de tensão é rebaixado em subestações locais.

Além da técnica de transmissão de energia em corrente alternada, há também uma outra maneira de transmissão que ocorre em corrente contínua em alta tensão HVDC (*High Voltage Direct Current*), a qual é somente vantajosa em relação à transmissão em corrente alternada a partir de grandes distâncias (KUNDUR, 1949), interconexão de sistemas assíncronos e transmissão de energia em ambientes submarinos (PADIYAR, 2007), no entanto esse tipo de transmissão e suas ocorrências não serão estudados deste trabalho. Igualmente foi feito para as máquinas síncronas, para linhas de transmissão também será desenvolvida uma modelagem matemática que contenha o comportamento e as características das linhas. Simplificações em relação aos modelos matemáticos reais também serão adotadas no estudo.

2.2.2 Cálculo e Modelagem Simplificados

Das simplificações adotadas no estudo de linhas de transmissão, é possível a utilização de três diferentes categorias tendo como base o comprimento total dessas linhas para a definição da simplificação. As equações que descrevem os comportamentos reais das linhas de transmissão com base nos níveis de corrente e tensão no transmissor e receptor, comprimento e parâmetros da linha são

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} + e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} - e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) \quad (2.23)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} + e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} - e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) \quad (2.24)$$

Nas equações 2.23 e 2.24 os termos \dot{U}_1 e \dot{U}_2 são as tensões no transmissor e receptor, \dot{I}_1 e \dot{I}_2 as correntes no transmissor e receptor, respectivamente. \dot{Z}_c representa a impedância característica da linha e que pode ser calculada como $\dot{Z}_c = \sqrt{Z/Y}$ sendo que $Z = R + j\omega L$ é a impedância em série por unidade de comprimento por fase da linha e $Y = G + j\omega C$ é a admitância em paralelo por unidade de comprimento da linha, R e

G representam a resistência de condutância da linha (FUCHS, 1977). Na Fig.5 pode-se observar um exemplo de uma linha de transmissão com seus parâmetros.

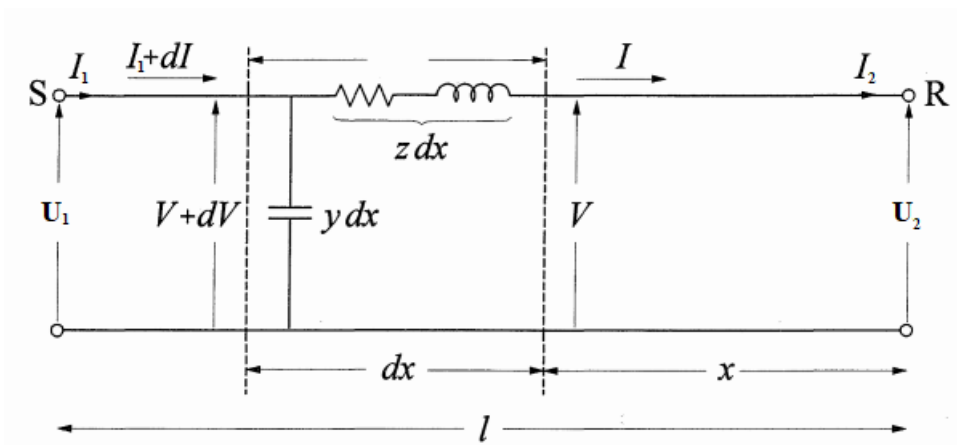


Figura 5 – Exemplificação de modelo de uma linha de transmissão com seus parâmetros por fase (KUNDUR, 1949).

2.2.2.1 Linhas Curtas

Dentre os tipos de simplificações de linhas de transmissão, o método das linhas curtas é o mais sintetizado, sendo esse modelo mais utilizado para linhas cuja extensão seja de até 80km. Nesse tipo de linha a simplificação se dá pela desconsideração da admitância em paralelo por fase, uma vez que seu comprimento é muito pequeno, assim considera-se apenas os efeitos da resistência e indutância em série na sua representação (LEMONS, 2008). A Fig.6 exemplifica uma linha de transmissão curta.

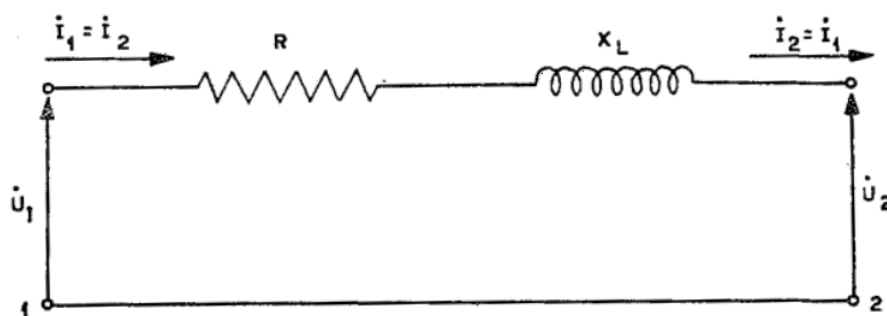


Figura 6 – Circuito equivalente de uma linha curta (FUCHS, 1977).

Tendo como base as equações 2.23 e 2.24 para linhas reais, a simplificação para linhas curtas fica da seguinte maneira

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z \quad (2.25)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \quad (2.26)$$

2.2.2.2 Linhas Médias

A modelagem de linhas médias é o segundo tipo de simplificação para linhas de transmissão as quais possuem sua extensão entre $80km$ a até $240km$. Para essa simplificação existem duas maneiras de se fazer a representação do modelo, o primeiro deles é a representação do Circuito T já o segundo é o Circuito π , sendo o Circuito π a representação mais utilizada (LEMOS, 2008).

Diferentemente das equações 2.25 e 2.26, para linhas médias as simplificações acerca do modelo real não poderão ser tão grandes como é no caso das linhas curtas. As equações que representam a modelagem matemática de linhas médias para corrente e tensão são

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \right) + \dot{I}_2 Z \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{6} \right) \quad (2.27)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \right) + \dot{U}_2 Y \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{6} \right) \quad (2.28)$$

Embora os modelos de Circuito T e Circuito π sejam ambos aceitáveis para a modelagem de linhas médias, o primeiro caso requer o estabelecimento de nó ou barra por cada linha de transmissão que for incluída à modelagem, isso significa em um volume maior de equações a serem trabalhadas, sendo assim opta-se pelo uso do Circuito π . As equações 2.27 e 2.28 em configuração π possuem uma pequena alteração (KUNDUR, 1949).

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \right) + \dot{I}_2 Z \quad (2.29)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \right) + \dot{U}_2 Y \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) \quad (2.30)$$

É exemplificada uma linha de transmissão na modelagem de Circuito π , tendo como referência as equações 2.29 e 2.30, na Fig.7. Especificamente para este trabalho será implementada essa modelagem de linha de transmissão para as simulações adotadas.

2.2.2.3 Linhas Longas

O terceiro método de modelagem para linhas de transmissão é o de linhas longas, as quais são consideradas linhas que possuem sua extensão a partir de $240km$ (LEMOS, 2008). Embora o limite superior das linhas médias seja o início das longas, a modelagem das médias ainda é insuficiente para os fins desejados. Sendo assim, para as linhas de transmissão longas, devido a maior necessidade de precisão dos cálculos deve-se utilizar

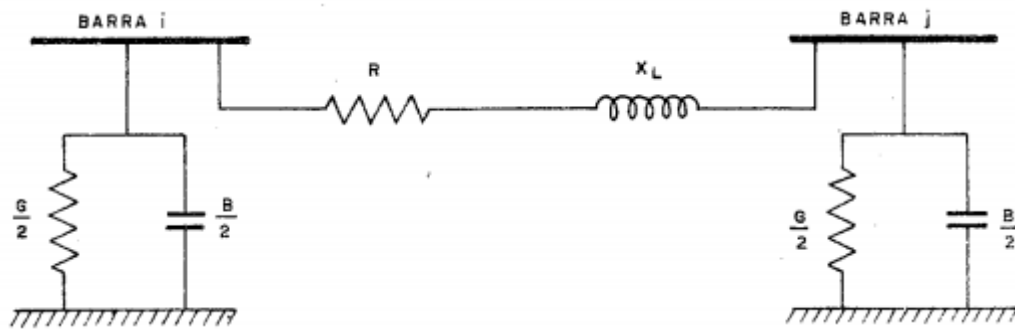


Figura 7 – Circuito equivalente de uma linha média (FUCHS, 1977).

as equações reais dispostas em 2.23 e 2.24. Uma segunda maneira de representação dessas equações é através de funções trigonométricas hiperbólicas

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cosh \gamma l + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \sinh \gamma l \quad (2.31)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cosh \gamma l + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \sinh \gamma l \quad (2.32)$$

2.3 Cargas

Entende-se por carga em um sistema elétrico de potência qualquer unidade que esteja recebendo potência elétrica advinda da geração por meio de linhas de transmissão, essa potência recebida é utilizada para realização de trabalho, sendo portanto, considerada o ponto final da transmissão de energia elétrica (SAADAT et al., 1999). Sabendo que no decorrer do dia há variações na quantidade de energia consumida em uma carga com base na sua demanda, energia essa que é fornecida pelos geradores, é possível concluir que as cargas são responsáveis por exercer influência na estabilidade de sistemas de potência.

Neste trabalho, a modelagem das cargas será feita a partir de métodos de simplificações os quais consideram que no comportamento de cargas reais, frequência e tensão do barramento possuem relações diretas com a carga. Especificamente para este trabalho o método de simplificação terá como base polinômios, esses que terão em suas variáveis a frequência do barramento e também sua tensão e a modelagem adotada será a modelagem polinomial ZIP.

2.3.1 Modelo ZIP

Na modelagem ZIP alguns fatores devem ser considerados, dentre eles a potência ativa P_0 , potência reativa Q_0 , tensão de referência V_0 , e os fatores de sensibilidade da potência ativa e da potência reativa, que são respectivamente α_p e α_q . As equações que descrevem esse modelo para as potências ativa e reativa são

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_p} \quad (2.33)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_q} \quad (2.34)$$

Para os expoentes das equações 2.33 e 2.34 existem 3 possibilidades, as quais são

1. $\alpha_p = \alpha_q = 2 \rightarrow$ Carga de impedância constante (Z);
2. $\alpha_p = \alpha_q = 1 \rightarrow$ Carga de corrente constante (I);
3. $\alpha_p = \alpha_q = 0 \rightarrow$ Carga de potência constante (P);

Em uma modelagem ZIP, para a simplificação adotada, sua composição é feita a partir da utilização dos expoentes de impedância, corrente e potência constantes na equação, sendo assim as expressões para potência ativa e potência reativa, respectivamente, serão

$$P = P_0 \left(a_p + b_p \frac{V}{V_0} + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.35)$$

$$Q = Q_0 \left(a_q + b_q \frac{V}{V_0} + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.36)$$

Das equações 2.35 e 2.36, os termos a_p e a_q representam as parcelas de carga ativa e reativa modeladas com potência constante. As parcelas b_p e b_q são modeladas à corrente constante e por fim as parcelas c_p e c_q são modeladas à impedância constante. Além disso há outro fator que deve ser considerado, o qual a soma das parcelas $a_p + b_p + c_p$ e também $a_q + b_q + c_q$ deve ser sempre igual a 1 para cada uma das somas.

A modelagem de uma carga que está ligada a um barramento b é realizada a partir das equações que consideram a potência ativa P_b e potência reativa Q_b no barramento. Este modelo de carga abordado é o qual as cargas estão em dependência com a tensão. Para o modelo em análise, faz-se a utilização de polinômios que são responsáveis pela descrição das equações de potência como em 2.37 e 2.38.

$$P_b(V_b) = \sum_{i=0}^N a_i V_i^b \quad (2.37)$$

$$Q_b(V_b) = \sum_{i=0}^N b_i V_i^b \quad (2.38)$$

Nas equações 2.37 e 2.38, as variações dos termos i vão de $i = 0$ até N , sendo que o valor máximo de N é $N = 2$. Os termos a_i e b_i são dependentes da carga e quando $i = 0$ a parcela que é dependente da tensão é perdida, o que resulta em

$$P_b(V_b) = a_0 \quad (2.39)$$

$$Q_b(V_b) = b_0 \quad (2.40)$$

Já quando passa para a segunda parcela do somatório, em que $i = 1$, a equação que se resulta é uma equação linear e os termos são proporcionais, sendo assim a tensão se torna proporcional à corrente elétrica como é mostrado nas equações 2.41 e 2.42.

$$P_b(V_b) = a_1 V_b \quad (2.41)$$

$$Q_b(V_b) = b_1 V_b \quad (2.42)$$

Por fim, ao chegar no termo final em que $N = 2$, o comportamento do termo de potência é igual a de uma impedância constante e se torna proporcional a um termo de tensão de segunda ordem como descrito nas equações 2.43 e 2.44.

$$P_b(V_b) = a_2 V_b^2 \quad (2.43)$$

$$Q_b(V_b) = b_2 V_b^2 \quad (2.44)$$

Para uma modelagem mais complexa, as três equações para potência ativa e potência reativa acima são somadas, o que resulta em uma equação polinomial de segunda ordem que é descrita em termos de tensão elétrica, as equações para a potência ativa e reativa nessas condições são escritas como

$$P_b(V_b) = a_0 + a_1 V_b + a_2 V_b^2 \quad (2.45)$$

$$Q_b(V_b) = b_0 + b_1 V_b + b_2 V_b^2 \quad (2.46)$$

Parte III

Estabilidade Transitória

3 Contextualização

A estabilidade de um sistema elétrico de potência ocorre quando ele tende a desenvolver forças restauradoras que sejam iguais ou maiores do que os valores das perturbações aplicadas nele com o intuito de se manter um estado de equilíbrio. Além disso, os casos em que essas forças forem suficientemente maiores para superarem as perturbações e manterem as máquinas do sistema em sincronismo entre si, esse sistema é classificado como estável e permanecerá nesse estado de sincronismo (SAADAT et al., 1999).

Os esforços no estudo da estabilidade de sistemas elétricos de potência são concentrados na variação do sincronismo de máquinas elétricas que estão inseridas neste sistema após a ocorrência de uma perturbação. Esse estudo pode ser subdividido em duas grandes categorias: *estabilidade dinâmica* e *estabilidade transitória*. A primeira refere-se ao retorno do sincronismo após a ocorrência de pequenas perturbações que ocorrem ao sistema elétrico no decorrer do dia, como por exemplo a variação de cargas de maneira moderada e não repentina.

Já a transitória, esta que será parte do estudo deste trabalho, é considerada como o retorno das máquinas elétricas ao sincronismo após a ocorrência de grandes perturbações ao sistema, como por exemplo a perda de linhas de transmissão, grandes perturbações em decorrência de faltas e a perda de cargas de maneira repentina. O estudo de estabilidade transitória é realizado para se garantir a confiabilidade de que o sistema seja capaz de restabelecer o sincronismo após a ocorrência de grandes perturbações (MACHOWSKI et al., 2020). A Fig 8 apresenta um diagrama de blocos em que nele é possível observar os diferentes tipos de estabilidade e as perturbações que podem ocasioná-los.

Durante a operação da máquina em condições regulares e em regime permanente, o eixo de rotação do rotor e o eixo de rotação do campo magnético induzido no estator estão em sincronismo a uma velocidade denominada de velocidade síncrona, que nesta situação é a velocidade de rotação do rotor ω_{mec} . A partir do momento em que ocorre uma perturbação, o eixo do rotor irá acelerar ou desacelerar, causando portanto um movimento relativo entre esses dois eixos e a equação que descreve essa movimentação é denominada *equação de swing* (KUNDUR, 1949).

Existem dois fenômenos que devem ser observados em estabilidade transitória quando há ocorrência de faltas e que, por consequência, causam momentaneamente ou não a perda do sincronismo da máquina. O primeiro é que, a depender da intensidade da perturbação que ocorrer, caso não seja de grandes proporções e não haja variação da P_{mec} na entrada é possível que após o ocorrido a máquina volte à sua posição inicial de sincronismo e permaneça em estabilidade.

Já o segundo caso, quando há a ocorrência de faltas de maiores proporções como variações na potência de geração P_{mec} , faltas ou variações bruscas de carga, a máquina até consegue retornar ao sincronismo, no entanto o ângulo de potência δ irá oscilar entre um valor $\delta_{m\acute{a}x}$ e δ_{inic} até que se estabilize em um novo ângulo de potência. Quando não há a ocorrência dos dois casos acima a máquina perde o sincronismo e se torna instável (SAADAT et al., 1999).

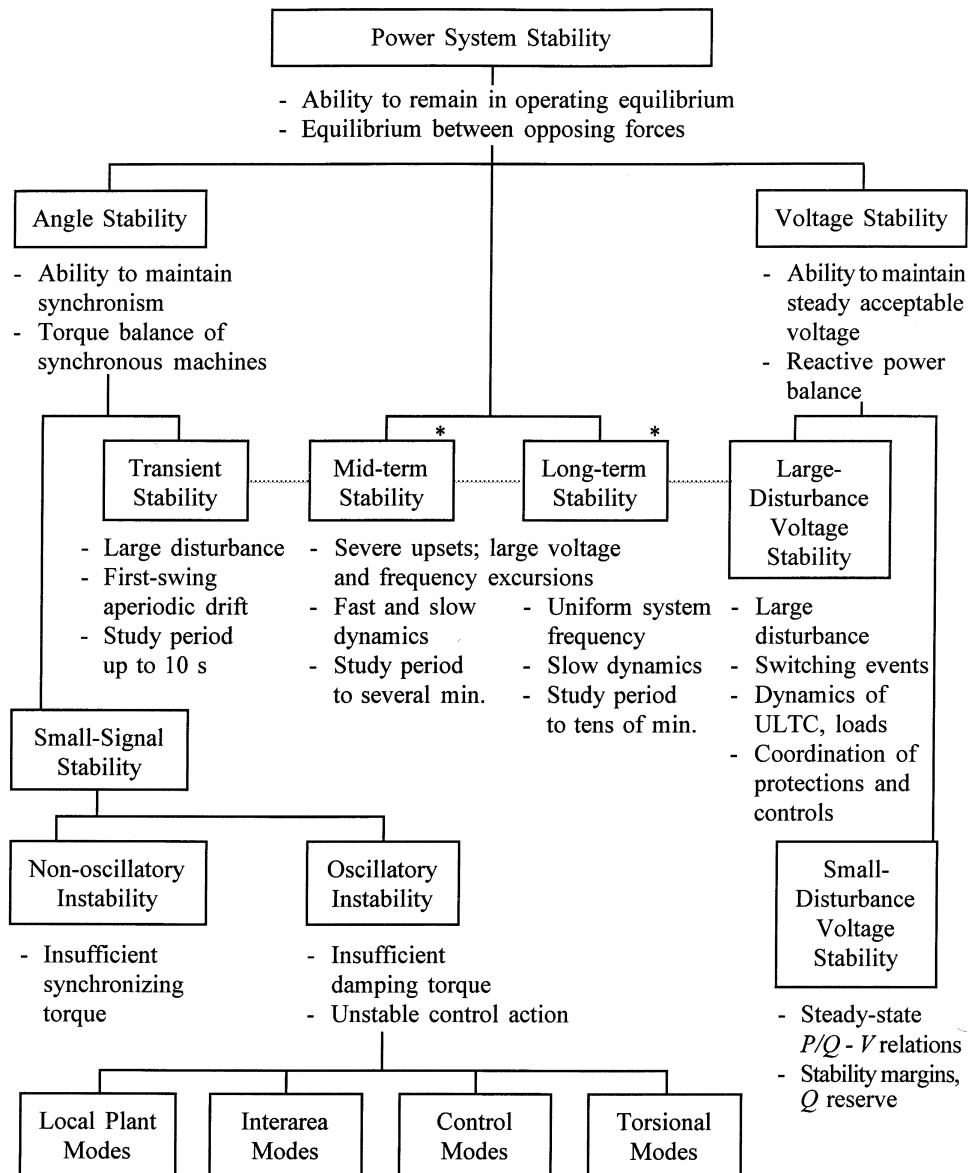


Figura 8 – Tipos de estabilidades em um sistema elétrico de potência e os tipos de perturbações (KUNDUR, 1949).

3.1 Análise Da Estabilidade

Quando um sistema encontra-se em um regime estacionário, no qual não há perturbações ocorrentes, e as que por ventura acontecerem são as de pequena intensidade

ou as inerentes ao funcionamento do sistema, pode-se considerar que ele esteja praticamente em equilíbrio. A este tipo de operação denomina-se condição pré-falta, e nesse tipo de condição o ângulo de potência δ é também constante. Além disso, como o ângulo é constante, isso significa que todas as suas derivadas serão iguais a zero, sendo assim a velocidade angular ω sendo $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ e a aceleração angular $\dot{\omega}$ sendo $\dot{\omega} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$ são nulas (KUNDUR, 1949).

Durante a ocorrência de uma falta no sistema é definido t_0 como o instante inicial da falta, sendo $t_0 = 0$. A partir desse instante as características do sistema são modificadas, havendo então uma readequação das equações diferenciais governantes do sistema com base na intensidade da ocorrência da falta. A eliminação da falta ocorre no instante de abertura t_a e tende a infinito com a nova modelagem matemática do sistema, sendo possível o retorno ao estado inicial pré-falta caso a falta não seja de intensidades significativas.

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + T \frac{d\delta}{dt} = P_{mec} - P_{elét} = 0 \begin{cases} t \leq 0, & P_{elét} = P_{elét}^{prf} \\ 0 < t_0 \leq t_a, & P_{elét} = P_{elét}^f t_a \\ t_a \geq, & P_{elét} = P_{elét}^{pf} \end{cases} \quad (3.1)$$

A equação acima representa a taxa de variação do ângulo de potência δ em relação ao tempo durante os períodos pré, durante e pós falta, e também suas respectivas potências elétricas durante a ocorrência de cada situação. Sendo assim, a equação acima pode ser separada em três situações de análise distintas:

3.1.1 Pré-falta

Para uma análise em um regime de pré falta, pode-se obter uma equação diferencial fazendo a substituição da $P_{elét}$ na equação de swing, o que resulta em

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + T \frac{d\delta}{dt} = P_{mec} - P_{elét}^{prf} = 0 \begin{cases} t \leq 0 \\ \delta(t) = \delta^0, \quad \frac{d^2\delta(0)}{dt^2} = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

3.1.2 Durante a falta

Durante a ocorrência da falta, há uma reorganização das equações diferenciais, portanto durante esse esta ocorrência a nova modelagem de equações se da pela seguinte forma

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + T \frac{d\delta}{dt} = P_{mec} - P_{elét}^f \begin{cases} 0 < t \leq t_a \\ \delta(t) = \delta^0, \quad \frac{d^2\delta(t_a)}{dt^2} \neq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

3.1.3 Pós-falta

Por fim, após o término da duração da falta, há novamente uma reorganização das equações diferenciais que regem o sistema, a nova reorganização fica igual a

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + T \frac{d\delta}{dt} = P_{mec} - P_{elét}^{pf} = 0 \begin{cases} t > t_a \\ \delta^{pf}(t_a) = \delta^f(ta) \end{cases} \quad (3.4)$$

Dados os três casos sobre a estabilidade transitória, pode-se entender que o primeiro, sistema pré-falta, se caracteriza como um sistema em regime permanente no qual a taxa de variação do ângulo de potência em relação ao tempo é igual a zero. Já durante a ocorrência de uma falta, há a geração de uma perturbação no sistema e por consequência há uma variação do ângulo de potência com relação ao seu estado inicial. E por fim, em um sistema após a eliminação da falta e com a máquina ainda em sincronismo, um novo ângulo de potência é definido para a operação desse sistema.

Existem algumas técnicas que podem ser utilizadas para se calcular as soluções das equações diferenciais em cada situação apresentada. Para o primeiro caso a aplicação do cálculo do fluxo de potência, o qual utilizada do cálculo do ponto de equilíbrio do conjunto de equações, já satisfaz o problema. Na ocorrência da falta, durante esse período será contabilizado o tempo de duração dessa ocorrência e para isso deve-se saber qual será o valor máximo do tempo de abertura t_a com o intuito de que o sistema ainda permaneça em equilíbrio e em sincronismo, utiliza-se esse tempo para saber qual será o tempo crítico de abertura para a programação dos relés. Esse tempo máximo é denominado de tempo crítico de abertura t_{ca} e é utilizado para se calcular a solução do sistema em pós-falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).

3.2 Pontos de Equilíbrio

Na sessão 2.1.3 é deduzida a equação de swing, a qual descreve o comportamento do ângulo de potência quando há a ocorrência de uma falta. Em seguida, nas subseções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3, é explicado o comportamento de um sistema de potência pré, durante e após a eliminação dessa falta e como se desenvolve esse mesmo ângulo de potência após a eliminação. Sendo assim, há um conceito importante que deve ser elucidado para o regime em que a máquina se encontrará após a eliminação da falta, que é o conceito de pontos de equilíbrio.

Os pontos de equilíbrio significam a operação da máquina síncrona em um ângulo de potência específico, em que nele há pequenas variações do seu valor ao decorrer do dia, no entanto para fins de cálculo prático nesse trabalho consideram-se nulas essas pequenas variações. Portanto, a menos que haja uma perturbação significativa no sistema, a máquina continuará operando em regime permanente até que a essa ocorra uma falta e

cause uma variação no ângulo de potência. Suprimida a falta, o ângulo poderá, a depender da intensidade da falta, voltar a seu valor inicial ou então possuirá um novo valor de operação de sincronismo. De acordo com (MACHOWSKI et al., 2020), há três posições possíveis para um ângulo de potência após a ocorrência da falta, e que são exemplificadas na Fig.9.

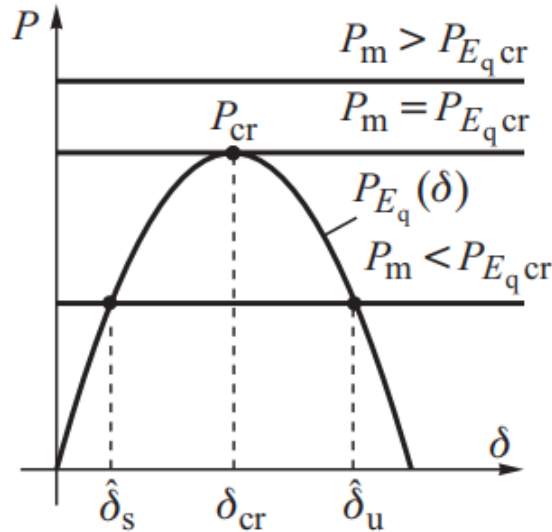


Figura 9 – Curva Potência versus Ângulo de potência de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito. (MACHOWSKI et al., 2020).

Para se entender a curva presente na Fig.9 deve-se apresentar a equação que elucida a potência elétrica nos terminais de uma máquina elétrica tendo como base os valores de tensão nos terminais da máquina E_q , tensão no barramento ao final da linha de transmissão V_b e impedância da linha somada à impedância interna do gerador X_d . O desenvolvimento matemático detalhado para esse equacionamento pode ser encontrado em (CHAPMAN, 2013), e de acordo com o autor, a equação final é igual a

$$P_{elét} = \frac{(E_q \cdot V_b)}{X_d} \sin(\delta) \quad (3.5)$$

Sabendo disso, como é uma equação que possui em sua composição uma parcela senoidal variante com base no valor do ângulo de potência, para um valor de δ igual a $\delta = \frac{\pi}{2}$, a função senoidal será de valor máximo já que $\sin(\delta)$ será igual a 1, para este caso específico a $P_{elét}$ será máxima também e denominada de potência elétrica crítica $P_{C_{elét}}$ e o ângulo δ será o ângulo de potência crítico δ_c .

A partir da equação 3.5 sabe-se que a potência elétrica nos terminais da máquina possui um sinal senoidal, já para a potência mecânica na entrada da máquina ela, na curva $Px\delta$, é representada por uma reta já que depende apenas da potência mecânica capaz de manter o eixo do rotor em rotação e injetar potência na máquina. Portanto, para os pontos de equilíbrio segundo (MACHOWSKI et al., 2020) tem-se na Fig.9 que

1. $P_{mec} > P_{celét}$ → Não há ponto de equilíbrio nessa situação, uma vez que fica evidente a não existência de um ponto de equilíbrio.
2. $P_{mec} = P_{celét}$ → Só há um único ponto de equilíbrio e é quando $\delta = \frac{\pi}{2}$.
3. $P_{mec} < P_{celét}$ → Esta situação representa um regime de operação normal de uma máquina elétrica em sincronismo.

3.2.1 Região de Estabilidade

Como explicado na sessão 3.2, o sincronismo de uma máquina elétrica é mantido após a eliminação de uma falta no momento em que há a atuação dos dispositivos de segurança quando a intensidade dessa falta não for suficiente para que a máquina saia do sincronismo, assim ela poderá retornar ao seu ponto de equilíbrio inicial ou se encontrar em outro ponto e manter a sua estabilidade. Para que se possa compreender melhor esses pontos de estabilidade e quando a máquina pode ou não perder o sincronismo existe um conceito denominado de região de estabilidade, que significa a região em que a máquina elétrica opera sem que ela perca o sincronismo. Esta área de atração é representada pela área presente na Fig.10

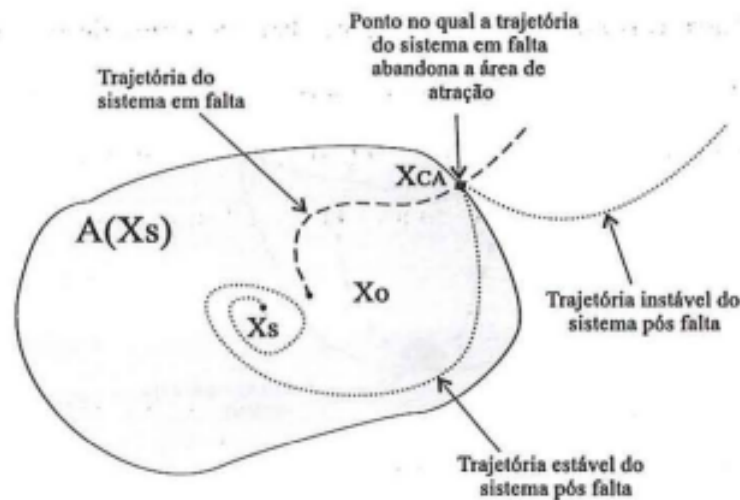


Figura 10 – Região de atração de uma máquina elétrica. (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Há alguns pontos interessantes na Fig.10, o primeiro deles é X_o que representa a operação da máquina antes da ocorrência de uma falta e em um ângulo de potência inicial δ_1 , ou seja, praticamente em regime permanente. Em seguida, com a ocorrência de uma falta, há a variação do ângulo de potência, uma vez que a máquina entra em aceleração com a potência mecânica sendo maior que a potência elétrica de armadura, causando um aumento no ângulo de potência, sendo assim surge o caminho tracejado indicando a trajetória do sistema em falta.

O ângulo de potência continua tendo seu valor aumentado até que chega na região de fronteira dessa área de atração, denominado de ponto crítico da área e ângulo de potência crítico δ_c , a partir desse ponto ele poderá continuar aumentando seu valor e assim a trajetória passa a se tornar instável, com a máquina perdendo o sincronismo, ou então quando chegar ao ponto crítico a falta é eliminada e ele retornar para o interior da região de atração porém em um terceiro ponto estável pós falta X_s e novo ângulo de potência δ_3 . Também é possível a eliminação da falta antes de se chegar ao limite da região de atração, podendo retornar para o ponto inicial (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Outro conceito importante a ser elucidado é o de tempo crítico de abertura, basicamente ele significa o tempo máximo da atuação do sistema de proteção da linha de transmissão. Uma das maneiras de se fazer o cálculo do tempo crítico é utilizando o método PEBS, que consiste em calcular a energia crítica na fronteira da região de estabilidade e fazer a simulação do sistema no ponto de equilíbrio pós falta até a energia atingir o valor de energia crítica. Para este trabalho especificamente o método utilizado para a seleção dos tempos de abertura dos relés foi o de tentativa e erro com três tempos selecionados: dentro da região de estabilidade, tempo crítico e fora da região de estabilidade.

4 Simulações e Resultados Parciais

Uma vez que foram realizadas todas as modelagens matemáticas que comportem os elementos discutidos neste trabalho, é possível que sejam realizadas simulações para que possa-se entender o comportamento de um sistema elétrico de potência quando este está sujeito a uma grande perturbação e com isto também se implementar técnicas que sejam capazes de melhorar a margem da estabilidade transitória desses sistemas. Especificamente neste trabalho serão desenvolvidas simulações com base no modelo de sistema de duas áreas em que há o fluxo de potência entre duas máquinas na primeira área para a segunda área que contém outras duas máquinas.

4.1 Modelo De Duas Áreas

A Fig.11 representa o sistema elétrico que será simulado com o intuito de se fazer o estudo da estabilidade transitória e das consequências da ocorrência de uma falta no sistema. Nele serão analisados os barramentos do complexo elétrico para que assim seja possível verificar o comportamento da estabilidade do sistema em relação aos elementos que o compõe, tal como geradores e as cargas conectados ao barramento.

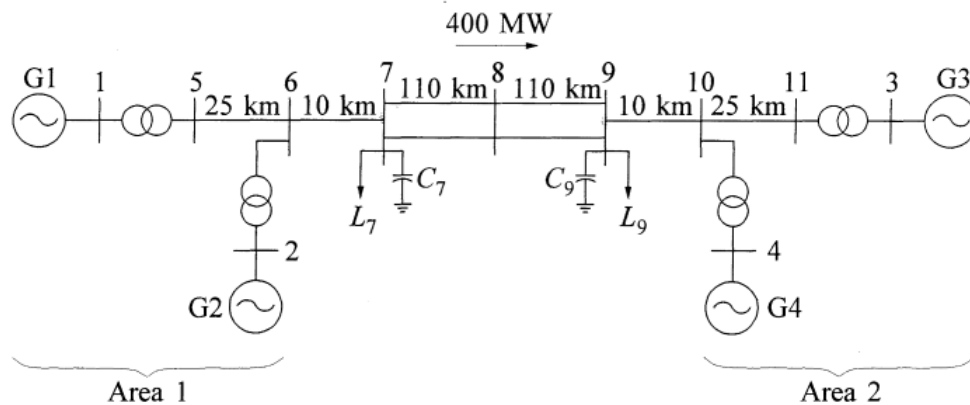


Figura 11 – Sistema elétrico de duas áreas com quatro máquinas elétricas. (KUNDUR, 1949).

O sistema elétrico presente na Fig.11 é composto por duas áreas conectadas por um conjunto de linhas de transmissão em que há o escoamento de 400 MW potência da primeira para a segunda área. Cada uma delas é composta por um par de unidades geradoras com 20 kV e 900 MVA de capacidade. Os geradores possuem seus parâmetros descritos em *pu* nas bases kV e MVA conforme descrito:

- Reatâncias

- $X_d = 1,8$; $X_q = 1,7$; $X_l = 0,2$;
- Reatâncias transitórias
 - $X'_d = 0,3$; $X'_q = 0,55$;
- Reatâncias sub-transitórias
 - $X''_d = 0,25$; $X''_q = 0,25$;
- $R_a = 0,0025$;
- Constante de inércia máquinas elétricas 1 e 2: $H = 6,5$;
- Constante de inércia máquinas elétricas 3 e 4: $H = 6,175$;
- Constantes de amortecimento
 - $T'_{d0} = 8,0s$; $T'_{q0} = 0,4s$; $T''_{d0} = 0,003s$; $T''_{q0} = 0,05s$; $K_d = 0$;

Já para o caso dos transformadores aumentadores eles possuem uma impedância em *pu* respectivamente igual a $0 + j0,15$ para bases de 20/230 kV e 900 MVA, e para as linhas de transmissão o nível de tensão nominal é de 230 kV com seus parâmetros em *pu* de base são 230 kV e 100 MVA

- Resistência(*r*): $0,0001pu/km$;
- Reatância (X_L): $0,001pu/km$;
- Susceptância (b_c): $0.00175pu/km$;

A operação desse sistema ocorre com o escoamento de 400 MW de potência da área 1 com 2 máquinas síncronas (G1 e G2) para a área 2 com também 2 máquinas síncronas (G3 e G4), essas unidades apresentam potência ativa, potência reativa e tensão nos terminais iguais a

- G1 $\rightarrow P = 700MW, Q = 185MV ar, E_t = 1,03\angle 20,2^\circ$
- G2 $\rightarrow P = 700MW, Q = 235MV ar, E_t = 1,01\angle 10,5^\circ$
- G3 $\rightarrow P = 719MW, Q = 176MV ar, E_t = 1,03\angle -6,8^\circ$
- G4 $\rightarrow P = 700MW, Q = 202MV ar, E_t = 1,01\angle -17,0^\circ$

Além disso, as cargas são supridas por potência reativa pelos capacitores (Q_C) em paralelo nos barramento 7 e 9 possuem as seguintes características

- Barramento 7 $\rightarrow P_L = 967MW, Q_L = 100MV ar, Q_C = 200MV ar$

- Barramento 9 $\rightarrow P_L = 1.767MW, Q_L = 100MV\text{ar}, Q_C = 350MV\text{ar}$

Todas as simulações que foram realizadas para este trabalho foram feitas no software *MATLAB* no ambiente Simulink, que é um ambiente para modelagem e design incluindo de sistemas elétricos de potência. Neste ambiente há a utilização de blocos e equacionamentos matemáticos em que neles contém as equações citadas na seção 2.

4.2 Falta trifásica sem a utilização do TCSC

Na Fig.12 está representado o esquemático do circuito simulado no *MATLAB* em que há o escoamento de 400 MW de potência da área 1 para a área 2 através de uma linha de transmissão trifásica e no meio da linha há uma falta. Nele é estudado os efeitos da ocorrência de uma falta em um sistema elétrico de potência, previamente sem a utilização do *FACTS TCSC*, e verificado a perda do sincronismo com base no tempo de resposta de atuação do sistema de proteção. A verificação e posteriormente validação da perda do sincronismo é com base na perda do fluxo de potência ativa através da linha e também no aumento contínuo dos ângulos das máquinas da área 1.

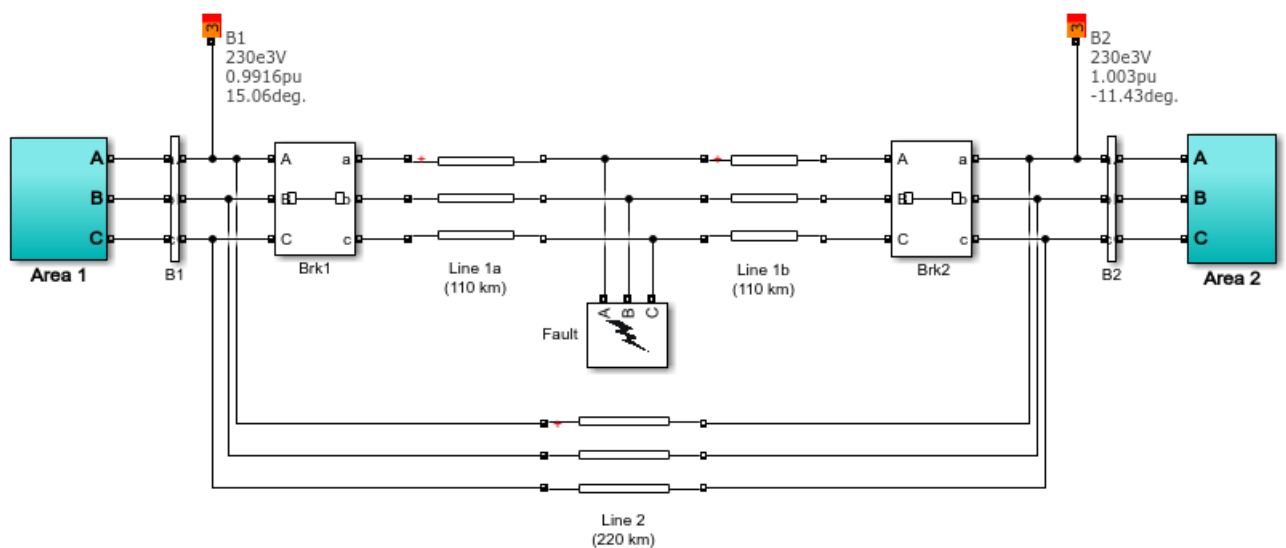


Figura 12 – Esquemático do sistema elétrico estudado sem o TCSC reproduzido no MATLAB. (MATLAB, 2021).

O tempo total de simulação foi de 14 segundos, sendo que o sistema opera normalmente até 1 segundo de duração quando então há a ocorrência da falta, a duração da falta se estende por mais 0,2 segundos. Na simulação foram desenvolvidas três situações de operação desse sistema: 1) eliminação da falta e retorno ao sincronismo, 2) tempo crítico de operação e retorno ao sincronismo, 3) perda de sincronismo das máquinas da área 1. A partir do tempo de referência de atuação dos equipamentos de proteção do sistema é que será possível visualizar a perda ou a permanência do sincronismo das máquinas.

Para tanto, a primeira situação em que há a eliminação da falta e por consequência a permanência da máquina síncrona em sincronismo, o tempo de atuação que foram programados os relés para abertura do sistema foi de 0,13 segundos após a ocorrência da falta. Pode-se notar pelos gráficos presentes na Fig.13 que o ângulo de potência das máquinas da área 1, G1 amarelo e G2 azul, permanecem constantes até 1s, após esse instante há um aumento significativo de valores e ao final uma estabilização com novos valores de ângulos de potência após a falta eliminada.

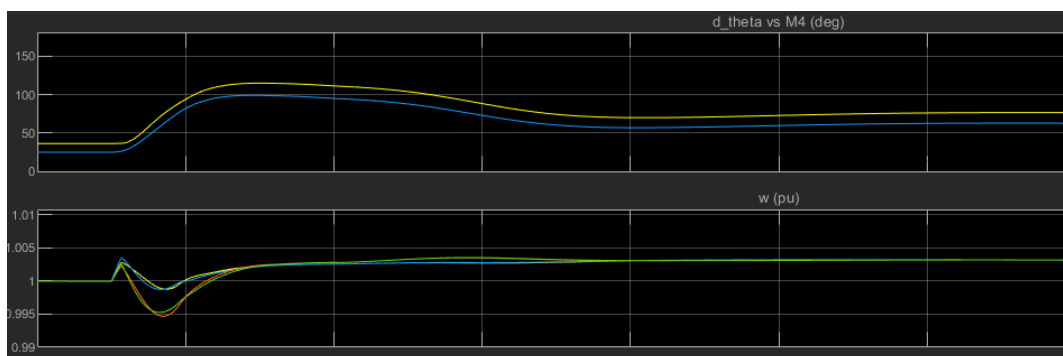


Figura 13 – Variação dos ângulos de potência e velocidades angulares das máquinas com abertura do relé em 0,13 segundos após a falta. (Autor, 2021).

A consequência para esse aumento dos ângulos é devido a falta que ocorre na linha, no gráfico abaixo que representa as velocidades angulares de todas as máquinas conectadas ao sistema, incluindo G3 verde e G4 vermelha, também é possível perceber que há inicialmente um aumento das velocidades e posteriormente uma queda subindo novamente para uma estabilização ao final. Quando a falta é eliminada há a estabilização do ângulo de potência das máquinas e também de suas velocidades síncronas, podendo observar que essas duas grandezas analisadas assumem novos valores após a eliminação da falta.

Na Fig.14 é possível observar, para o mesmo tempo de abertura dos relés de 0,13 segundos, que as tensões nos barramentos V1 e V2 das áreas 1 e 2 tem uma queda no nível de tensão assim que ocorre a falta e posteriormente um pico culminando em uma estabilização, igualmente ocorre com o fluxo de potência entre as duas áreas que é visto no gráfico da Fig.15, há uma queda brusca no fluxo de potência e após eliminada a falta o sistema se estabiliza e um valor abaixo de potência é escoado entre o sistema.

Já em sequência, quando há a alteração do valor do tempo de abertura dos relés é possível perceber pequenas variações no comportamento das funções do gráficos até que se chega ao tempo de abertura crítico do sistema de proteção em 0,142s. A este tempo o sistema ainda consegue retornar a operação sem que haja a perda do sincronismo, no entanto caso a falha persista e o valor do ângulo de potência continue aumentando é garantido que haverá a perda do sincronismo. Como dito, as curvas que representam o comportamento de uma operação com tempo de abertura rápido, 0,13s, e tempo de

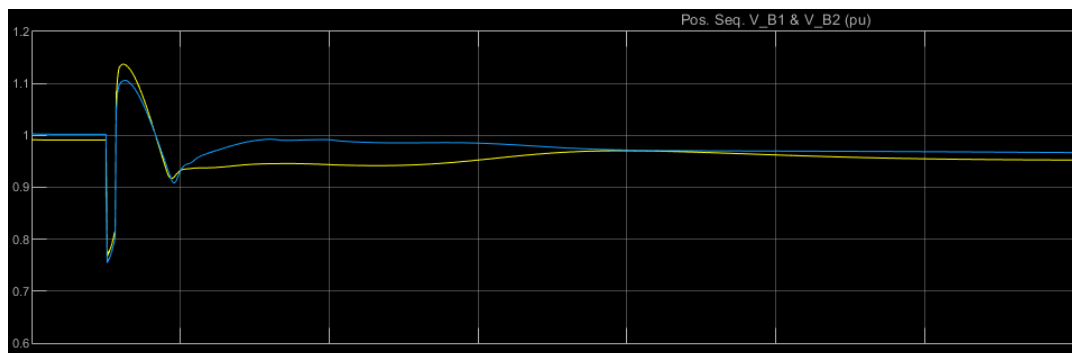


Figura 14 – Variação das tensões nos barramentos das máquinas M1 e M3 nas áreas A1 e A2 com tempo de atuação do relé 0,13s após a falta. (Autor, 2021).

abertura crítica, 0,142s, são ambos muito parecidos, sendo assim as Fig.14, Fig.13 e Fig.15 representam bem o comportamento tanto do aumento do ângulo de potência, variação da velocidade angular, nível de tensão nos barramentos das áreas 1 e 2 e também o escoamento do fluxo de potência entre áreas para uma situação em tempo de abertura crítica.

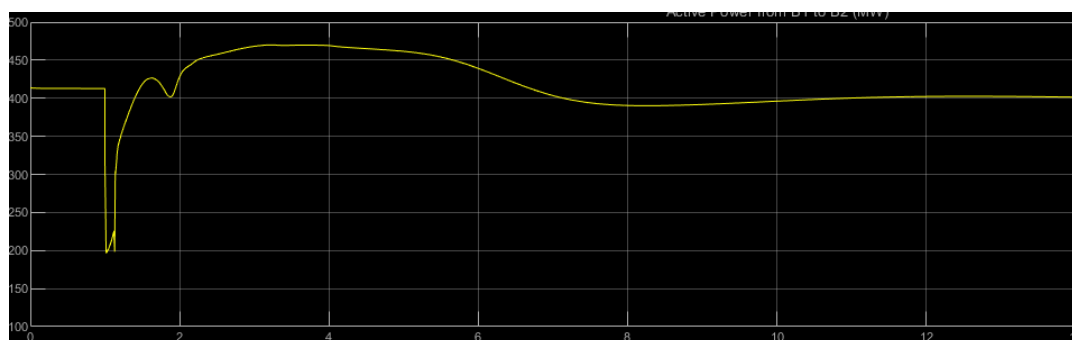


Figura 15 – Fluxo de potência entre as áreas A1 e A2 com tempo de atuação do relé 0,13s após a falta. (Autor, 2021).

Na última situação simula-se a aberturar do sistema de proteção para uma resposta acima do tempo crítico de abertura - 0,142s -, isso significa que devido ao fato dos ângulos de potência das máquinas G1 e G2 estarem ultrapassando o limite da região de estabilidade elas não conseguem manter o sincronismo e retornar a um novo ponto de operação do sistema.

Como pode ser observado na Fig.16, a simulação continua ocorrendo até que no momento em que as máquinas perdem o sincronismo a simulação para, mesmo que programada para que ocorra até 14 segundos. Isso é facilmente observável na Fig.16 em que no primeiro gráfico há o aumento indeterminado dos ângulos de potência das máquinas G1 e G2 e no gráfico abaixo as velocidades angulares dessas mesmas máquinas também estão aumentando indefinidamente.

Para o mesmo tempo de abertura de 0,143s do sistema de proteção, na Fig.17 é possível observar um mesmo comportamento para os barramentos das áreas 1 e 2,

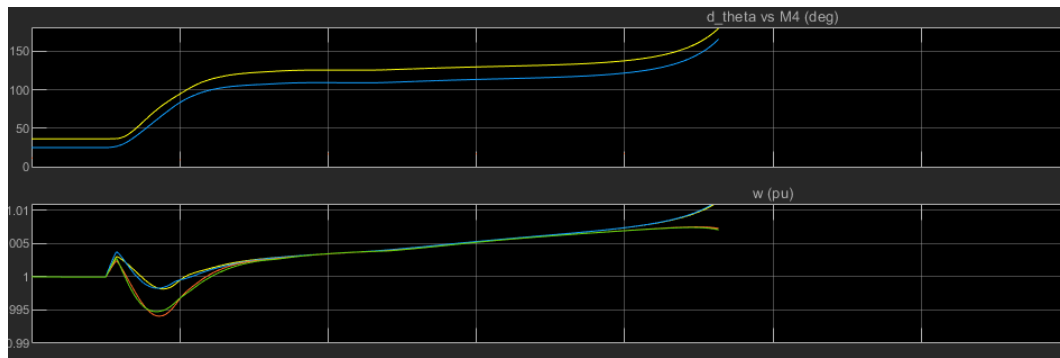


Figura 16 – Variação dos ângulos de potência e velocidades angulares das máquinas com abertura do relé em 0,143s após a falta. (Autor, 2021).

uma queda abrupta no nível de tensão quando há a ocorrência da falta, logo em seguida um aumento do nível de tensão, e por fim uma tentativa de se manter a estabilidade. No entanto as máquinas da área 1 perdem a estabilidade, sendo assim a falta não é eliminada, a consequência disso é o desligamento total das máquinas da rede.

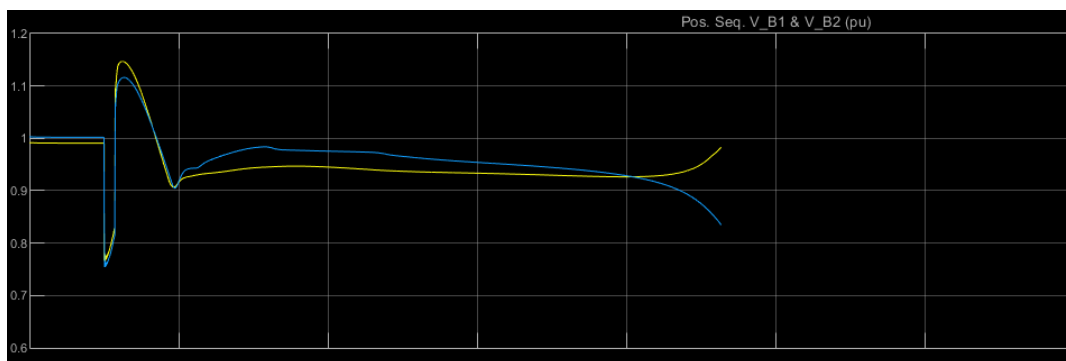


Figura 17 – Variação das tensões nos barramentos das máquinas M1 e M3 nas áreas A1 e A2 com abertura do relé em 0,143s após a falta. (Autor, 2021).

E como pode ser observado na Fig.18 o fluxo de potência também mantém o mesmo padrão de comportamento inicial como os anteriores em que a máquina ainda consegue voltar ao sincronismo, no entanto quando há o desligamento total dela do sistema é fácil ver que também há o interrompimento do escoamento de potência entre as duas áreas.

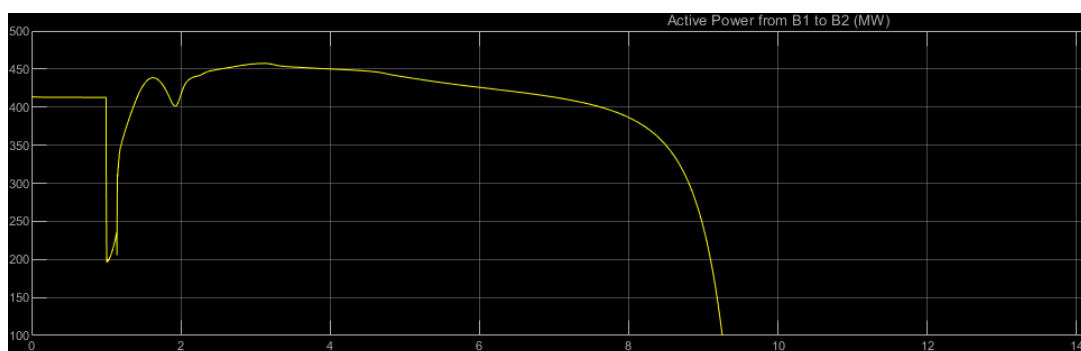


Figura 18 – Fluxo de potência entre as áreas A1 e A2 com abertura do relé em 0,143s após a falta. (Autor, 2021).

Parte IV

Conclusões

5 Conclusões Parciais

Neste trabalho utilizou-se do software *MATLAB* para se fazer o estudo e análise de um sistema elétrico de potência em que há a ocorrência de uma falta. Dispondo do método de tentativa e erro verificou-se que, em regime transitório, o sistema consegue manter o sincronismo com tempos de atuação do sistema de proteção entre 0,13s e 0,142s; sendo 0,142 o tempo crítico de atuação do sistema de proteção. Nessas condições, as máquinas da área 1 conseguem retornar a uma nova posição de estabilidade e manter-se em operação para garantir o fluxo de potência entre as duas áreas.

Para que seja definido um limite da região de estabilidade, verificou-se qual seria o instante em que as máquinas perdessem o sincronismo e assim fosse possível definir o tempo de abertura crítico citado acima. Logo, quando é ajustado o tempo de atuação do sistema de proteção para 0,143 pode-se verificar que há a perda do sincronismo de ambas as máquinas da área 1, provocando o fim da simulação que teve o tempo total de duração definido em 14s.

Além disso, é possível verificar também que houve um aumento ininterrupto dos ângulos de potência bem como das velocidades angulares das máquinas G1 e G2, e que há o interrompimento do fluxo de potência entre as máquinas da área 1 e área 2. Portanto, estas condições já são suficientemente necessárias para se concluir que houve a perda do sincronismo das máquinas do sistema.

6 Atividades Futuras

Como atividades futuras para este trabalho ficam as definições de *FACTS*, *TCSC* e as elaborações de simulações destes equipamentos no sistema elétrico para a verificação da melhoria da margem de estabilidade do tempo de atuação do sistema de proteção quando há a ocorrência de uma falta em comparação com a mesma linha quando não há a inserção deste equipamento. Serão realizadas as simulações com diferentes tempos de duração de faltas até que ocorra a perda do sincronismo desta máquina e a definição do seu novo ponto crítico com a utilização do *FACTS*.

Referências

- BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. *Estabilidade transitória em sistemas eletroenergéticos*. [S.l.]: EESC/USP, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 7, 36, 38 e 39.
- CARVALHO, J. F. d. Energia e sociedade. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 28, p. 25–39, 2014. Citado na página 14.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH editora, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 7, 20, 21 e 37.
- CONCORDIA, C. *Synchronous machines: theory and performance*. [S.l.]: Wiley, 1951. Citado na página 21.
- FUCHS, R. D. Transmissão de energia elétrica. *Linhas Aéreas*, v. 2, 1977. Citado 3 vezes nas páginas 7, 27 e 29.
- KRISHNA, S. *An introduction to modelling of power system components*. [S.l.]: Springer, 2014. Citado na página 22.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: McGraw-hill, 1949. v. 1. Citado 9 vezes nas páginas 7, 25, 26, 27, 28, 33, 34, 35 e 40.
- LEMOS, J. R. F. *Modelagem de linhas de transmissão para estudos eletromecânicos*. 70 p.12. Monografia (BACHAREL) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MACHOWSKI, J. et al. *Power system dynamics: stability and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 7, 15, 16, 20, 33 e 37.
- ONS. *Sistema Interligado Nacional (SIN)*. 2021. Acesso em: 13, outubro, 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Citado na página 14.
- ONS. *Sistema Interligado Nacional (SIN)*. 2021. Acesso em: 13, outubro, 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 14.
- PADIYAR, K. R. *FACTS controllers in power transmission and distribution*. [S.l.]: New Age International, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.
- RAMOS, R. A. et al. Modelagem de máquinas síncronas aplicada ao estudo de estabilidade de sistemas elétricos de potência. EESC/USP, 2000. Citado na página 25.
- SAADAT, H. et al. *Power system analysis*. [S.l.]: McGraw-hill, 1999. v. 2. Citado 7 vezes nas páginas 15, 19, 21, 23, 29, 33 e 34.
- SILVA, F. H. J. R. d. *Funções de Lyapunov estendidas para análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004. Citado na página 25.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado na página 21.